DOI 10.22337/2077-9038-2020-1-118-123

Явления массопереноса в системе «цементный раствор–композитная пластиковая арматура» на стадии структурообразования композита
Часть 1. Физические представления и математическая постановка задачи

С.В.Федосов, НИУ МГСУ, Москва
В.Е.Румянцева, ИвГПУ, Иваново
В.С.Коновалова, ИвГПУ, Иваново
И.Н.Гоглев ИвГПУ, Иваново

В статье описаны явления влагопереноса в системе «стекловолоконная арматура–цементный раствор» на стадии твердения и структурообразования композита. Для получения представленной математической модели влагопереноса при формировании цементной матрицы использованы уравнения математической физики, уравнения нестационарного массопереноса и дифференциальные уравнения массопроводности параболического типа. Рассмотрено влияние на процессы влагопереноса в системе «стекловолоконная арматура–цементный раствор» условий твердения композита: при отсутствии внешнего массообмена; при испарении влаги с поверхности, когда волокно не поглощает воду из цементной смеси, и при одновременном испарении влаги с поверхности и поглощении воды волокном. Полученная физико-математическая модель влагопереноса для системы «цементный раствор–стекловолоконная арматура» позволяет учитывать изменение водоцементного отношения на стадии твердения композита и устанавливать его влияние на структурообразование композита, на процессы самоуплотнения бетона, на его деформативные и эксплуатационные характеристики, а также на структурно-фазовый состав бетона. Математические модели дают возможность устанавливать необходимое водоцементное отношение для получения композита с заданными характеристиками, такими как прочность на сжатие и на растяжение при изгибе, трещиностойкость, плотность, пористость, коррозионная стойкость. Сформулированная физико-математическая задача может быть решена для частных случаев методом микропроцессов, что позволит произвести расчёты прочностных характеристик композита и осуществить численный анализ показателей долговечности и надёжности изделий и конструкций из армированного стекловолоконная арматурой бетона.

Ключевые слова: массоперенос, стекловолоконная арматура, водоцементное отношение, влагоперенос, цементный бетон, математическое моделирование.

Mass Transfer Phenomena in the System «Cement Mortar–Fiberglass Reinforcement» at the Stage of Composite Structure Formation
Part 1. Physical Representations and Mathematical Formulation of the Problem

S.V.Fedosov, NIU MGSU, Moscow
V.E.Rumyantseva, ISPU, Ivanovo
V.S.Konovalov, ISPU, Ivanovo
I.N.Goglev, ISPU, Ivanovo

The article describes the phenomena of moisture transfer in the system «fiberglass reinforcement – cement mortar» at the stage of hardening and structure formation of the composite. To obtain a mathematical model of moisture transfer in the formation of the cement matrix, the equations of mathematical physics, the equations of unsteady mass transfer and the differential equations of mass conductivity of parabolic type are used. The influence on the moisture transfer processes in the system «fiberglass reinforcement – cement mortar» of the conditions of hardening of the composite is considered: at the absence of external mass transfer; at the evaporation of moisture from the surface, when the fiber does not absorb water from the cement mixture, and with simultaneous evaporation of moisture from the surface and the absorption of water by the fiber. The obtained physical and mathematical model of moisture transfer for the system «cement mortar – fiberglass reinforcement» allows to take into account the change in water-cement ratio at the stage of hardening of the composite and to establish its influence on the structure formation of the composite, on the processes of self-compaction of concrete, its deformative and operational characteristics, as well as on the structural and phase composition of concrete. Mathematical models make it possible to establish the required water-cement ratio for obtaining a composite with specified characteristics, such as compressive strength and tensile strength, crack resistance, density, porosity, corrosion resistance. The formulated physical and mathematical problem can be solved for particular cases by the method of microprocesses, which will allow to calculate the strength characteristics of the composite and to carry out a numerical analysis of the durability and reliability of products and structures of concrete witha composite reinforcement.

Keywords: mass transfer, fiberglass reinforcement, water-cement ratio, moisture transfer, cement concrete, mathematical modeling.

В современном бетоноведении всё большее внимание уделяется армированию бетона неметаллическими волокнистыми материалами. Композитная арматура представляет собой неметаллические стержни из стеклянных, базальтовых, углеродных или арамидных волокон, пропитанных термореактивным или

термопластичным полимерным связующим и отверждённых. Главные преимущества неметаллических волокнистых материалов по сравнению с металлами и их сплавами: низкая плотность, высокая удельная жёсткость и прочность, достаточная усталостная прочность, долговечность, высокое сопротивление коррозии, хорошая теплоизоляция и низкое температурное расширение. Эти свойства позволяют считать неметаллические волокнистые материалы весьма привлекательными.

Однако волокна могут адсорбировать влагу из цементной смеси на стадии гидратации композита, тем самым снижая водоцементное отношение. Как известно, водоцементное отношение оказывает огромное влияние на деформативные и эксплуатационные характеристики цементобетона, его пористость, плотность и коррозионную стойкость.

При снижении водоцементного отношения происходит увеличение прочности и трещиностойкости бетона [1–4], уменьшается его пористость [5; 6].

Для учёта влияния изменений водоцементного отношения на прочностные характеристики бетонов выведены зависимости для расчёта состава бетонов различной плотности [7], в которых одним из основных учитываемых факторов является истинное водоцементное отношение.

Выведены уравнения для описания набора прочности бетоном в течение 28 суток твердения, на основании которых могут быть рассчитаны прочностные характеристики бетонов различных составов в зависимости от водоцементного отношения [8–10].

Имеются уравнения для установления степени гидратации и описания процессов твердения цементных бетонов в зависимости от водоцементного отношения [11; 12]. Установлено, что при повышении водоцементного отношения на стадии гидратации происходит формирование различного структурно-фазового состава бетона, образующиеся гидросиликаты кальция имеют пониженную основность, что негативно сказывается на прочности композита [12–15].

На основе значительных теоретических и экспериментальных исследований учёными выведены уравнения, описывающие влияние водоцементного отношения на процессы самоуплотнения бетона и его пористость [16].

Разработана математическая модель, выражающая зависимость отношения прочности бетона при сжатии к активности цемента от водоцементного отношения [17]. Математические модели позволяют не только прогнозировать влияние В/Ц на прочностные характеристики бетонов, но и проектировать составы цементного бетона, устанавливая необходимое водоцементное отношение для получения бетона с заданными характеристиками [17; 18].

Разработан алгоритм для определения воздухововлечения при твердении бетона, учитывающий влияние водоцементного отношения на основании расчётных формул прочности бетона [19]. Предложенный алгоритм позволяет также проектировать состав бетона с нормируемыми прочностью на сжатие, на растяжение при изгибе и морозостойкостью [19; 20].

Поскольку водоцементное отношение имеет большое значение на стадии структурообразования композита, необходимо учитывать все факторы, которые могут оказывать влияние на изменение количества воды затворения в цементной смеси в процессе твердения бетона. Одним из таких факторов является сорбирование воды стекловолокном.

Метод математического моделирования, использованный в работе, основан на уравнениях математической физики, уравнениях нестационарного массопереноса и дифференциальных уравнениях массопроводности параболического типа [21–23].

Математическая модель влагопереноса в системе «композитная неметаллическая арматура–цементный раствор» на стадии твердения композита

Математическая модель влагопереноса при формировании цементной матрицы будет включать нелинейные дифференциальные уравнения параболического вида второго порядка в частных производных для задач моделирования влагопроводности в защитном слое бетона и стекловолоконной арматуре:

$$\frac{\partial U_б(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left[k_б(U_б)\frac{\partial U_б(x,\tau)}{\partial x}\right] - q_{vm}(x,\tau), \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_a(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left[k_a(U_a)\frac{\partial U_a(x,\tau)}{\partial x}\right] +\cdot\, k_a(U_a)\frac{\partial U_a(x,\tau)}{\partial x}. \quad (2)$$

Уравнение (1) записано в декартовой системе координат, поскольку защитный слой бетона моделируется неограниченной пластиной. Уравнение (2) записано в цилиндрической системе, поскольку модель представлена для системы «стекловолоконная арматура–цементный раствор (тесто)».

Начальные условия:

$$U_б\,(x,\,\tau)|_{\tau=0} = U_{о.б}\,;\; U_а\,(x,\,\tau)|_{\tau=0} = U_{о.а}\,. \quad (3)$$

Здесь: $k_б$, $k_а$ – коэффициенты влагопроводности бетона и волокна соответственно, м^2/с; $q_{vm}(x,\tau)$ – отрицательный объёмный источник (сток) массы влаги, обусловленный снижением влагосодержания вследствие процессов гидратации, кг/м^3·с; x – координата, м; τ – время, с.

Источник массы зависит от протекающих процессов и может быть распределён по координате и времени.

Граничные условия к задачам (1)–(2) на стадии гидратации и структурообразования композита будут записаны следующим образом:

1) для бетона на наружной поверхности:

$$-k_б\cdot\rho_0\left.\frac{\partial U_б(x,\tau)}{\partial x}\right|_{x=\delta_б} = \beta(P_н - P_в); \quad (4)$$

2) на границе раздела «бетонный раствор (тесто)–волокно»:

$$U_а\,(x,\tau)|_{x=0'} = A_р\,U_б\,(x,\tau)|_{x=0'}\,, \quad (5)$$

$$-k_a\left.\frac{\partial U_a(x,\tau)}{\partial x}\right|_{x=0'} = -k_б\left.\frac{\partial U_б(x,\tau)}{\partial x}\right|_{x=0'}. \quad (6)$$

Здесь: $P_в$,$P_н$ – парциальные давления водяного пара в воздухе у наружной поверхности бетона и насыщенного пара при температуре поверхности бетона, Па; β – коэффициент массоотдачи, м/с; $A_р$ – коэффициент распределения, характеризующий статику процесса, то есть условия равновесия в твёрдофазной системе, кг/кг; $R_а$ – радиус стекловолоконной арматуры, м; $\delta_б$ – толщина защитного слоя бетона, м.

На стадии гидратации цементного бетона идёт связывание влаги и образование структуры цементного камня. Рассмотрим влияние на процессы влагопереноса в системе «стекловолоконная арматура–цементный раствор» условий твердения композита.

Рисунок 1 характеризует процессы, протекающие в армированном бетоне после заливки в закрытую форму, когда испарения влаги с поверхности не происходит.

Рисунок 2 характеризует процессы, протекающие в армированном бетоне после заливки в открытую форму, то есть происходит испарение влаги с поверхности, а волокно не поглощает воду из цементной смеси.

Рисунок 3 характеризует процессы, протекающие в армированном бетоне после заливки в открытую форму, при этом происходит одновременное испарение влаги с поверхности и поглощение воды волокном.

Когда структура цементного камня сформирована, то определяющими при переносе воды в бетоне будут диффузионные процессы, протекающие в порах композита. Если волокно интенсивно сорбирует воду из цементной смеси, то водоцементное отношение понижается, что отразится на формировании структуры бетона и его прочности. Это явление важно учитывать при получении композитов с заданными эксплуатационными характеристиками.

Работами профессора С.П. Рудобашты [24; 25] показано, что диффузия в непористых телах и полимерах протекает со значительно меньшими скоростями, чем в капиллярно-пористых телах. Поэтому при формулировке задачи диффузии влаги в стекловолоконной арматуре можно полагать, что поле влагосодержания локализуется в достаточно узкой зоне, не проникания до оси арматуры. А это, в свою очередь, позволяет в соответствующей задаче влагопроводности записать граничные условия:

$$U_{\text{а}}(x,\tau)|_{x = x_{\text{гр}}} = 0. \qquad (7)$$

При этом становится возможным перевести задачу массопроводности в цилиндрической системе координат к задаче в декартовой системе для неограниченной пластины с физических позиций в математической постановке. Таким образом, компилируется система уравнений (1), (2) с начальными условиями (3), граничным условием второго рода (4) на внешней границе бетонной пластины, условием первого рода (7) на движущейся внутренней границе задачи массопереноса в волокне и, наконец, граничным условием четвёртого рода (5), (6). В совокупности весь этот блок уравнений и формирует нелинейную краевую задачу нестационарной массопроводности в моделируемой системе. Современными средствами математического анализа решить поставленную задачу не удаётся.

Таким образом, представленная статья содержит теоретические основы явления влагопереноса в системе «стекловолоконная арматура–цементный раствор» на стадии твердения композита, включающие математический аппарат для описания процесса переноса влаги по толщине бетона до армирующего волокна с учётом его водопоглощения. Получение аналитических решений краевой задачи массопереноса не входит в рамки данной статьи и будет представлено в следующих работах авторов.

* * *

Представленная физико-математическая модель влагопереноса для системы «цементный раствор – стекловолоконная арматура» позволяет учитывать изменение водоцементного отношения на стадии твердения бетона и устанавливать его влияние на структурообразование композита и его эксплуатационные характеристики. В дальнейших работах сформулированная физико-математическая задача будет решена для частных случаев методом микропроцессов, что позволит произвести расчёты прочностных характеристик композита и осуществить численный анализ показателей долговечности и надёжности изделий и конструкций из армированного стекловолоконной арматурой бетона.

Литература

1. *Бенц, Д.П.* Влияние водоцементного отношения на свойства цементных композиций в ранней стадии их твердения / Д.П. Бенц, М.А.Пельц, Дж. Уинпелер // Цемент и его применение. – 2011. – № 3. – С. 47–52.

2. *Шатов, А.Н.* Высокопрочные бетоны. Доступные способы химической модификации / А.Н. Шатов // Технологии бетонов. – 2012. – № 9–10 (74–75). – С. 9–11.

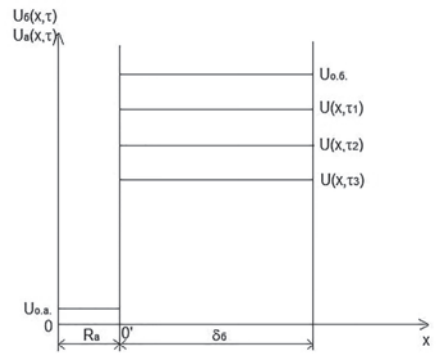

Рис. 1.

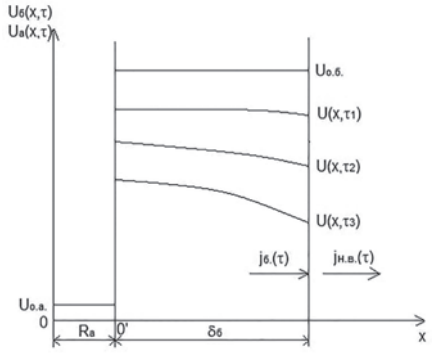

Рис. 2.

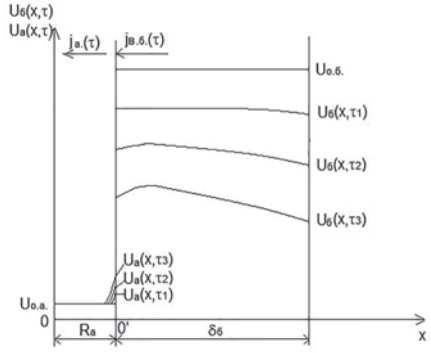

Рис. 3.

3. Влияние водоцементного отношения и суперпластификаторов на процессы тепловыделения, гидратации и твердения цемента / И.М. Иванов, Д.В. Матвеев, А.А. Орлов, Л.Я. Крамар // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 17. – № 2. – С. 42–49.

4. Влияние структуры цементного камня на процессы деформирования и разрушения при сжатии / И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Н.И. Макридин, Ю.В. Полубарова // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 4 (29). – С. 5–10.

5. *Очкина, Н.А.* Влияние модифицирующих добавок на пористость радиационно-защитного композита / Н.А. Очкина // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 2 (35). – С. 71–75.

6. *Разумейчик, В.С.* Влияние микронаполнителя на процессы формирования микроструктуры цементного камня / В.С. Разумейчик, С.С. Дереченник // Вестник Брестского национального технического университета. Строительство и архитектура. – 2012. – № 1 (73). – С. 46–51.

7. *Ковшар, С.Н.* Проектирование состава бетона с учётом его морозостойкости / С.Н. Ковшар, В.В. Бабицкий // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2010. – № 3. – С. 15–20.

8. *Куликов, Ю.Н.* Уплотняемость бетонной смеси – критерий прочности и водонепроницаемости обделки подземных сооружений / Ю.Н. Куликов // Горные науки и технологии. – 2014. – № 3. – С. 182–189.

9. *Михайлова, Н.А.* Множественные регрессионные модели прочности бетона на сжатие / Н.А. Михайлова, И.В. Стефаненко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2017. –№ 49 (68). – С. 30–42.

10. Проектирование составов фибробетона с использованием экспериментально-статистических моделей / Л.И. Дворкин, В.В. Житковский, Ю.А. Степасюк, Т.В. Ковальчук // Технологии бетонов. – 2016. – № 11–12 (124–125). – С. 29–35.

11. *Петрова, Т.М.* Теоретические основы прогнозирования влияния водоцементного отношения на величину ранней прочности пластифицированного цементного камня / Т.М. Петрова, А.Ф. Серенко // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – № 1 (18). – С. 61–64.

12. *Белых, А.Г.* Влияние водоцементного отношения на деформативные характеристики цементобетона / А.Г. Белых, Л.А. Кукарских // Актуальные вопросы проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе : сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений, посвящённых 105-летию академика А.В. Лыкова. – Курск, 2015. – С. 277–281.

13. Кинетика набора прочности бетона при раннем замораживании / Н.А. Кудайбергенова, Л.И., Чумадова, Н.И., Ватин [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. –№ 2 (41). – С. 7–17.

14. *Никишкин, В.А.* Микроструктура цементного камня и её влияние на водонепроницаемость и прочность бетона / В.А. Никишин // Технологии бетонов. – 2012. – № 5–6 (70–71). – С. 6–9.

15. Моделирование гидратации портландцемента без минеральных добавок / А.И. Гныря, Ю.А. Абзаев, С.В. Коробков, К.С. Гаусс // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 1 (709). – С. 25–35.

16. Параметры водопоглощения и пористости порошково-активированного высокопрочного бетона с низким удельным расходом цемента на единицу прочности / В.Л. Хвастунов, В.И. Калашников, А.В. Хвастунов, В.В. Пауск // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 4. – С. 45–51.

17. *Шумков, А.И.* Математическая модель закона водоцементного отношения в производстве тяжёлого бетона / А.И. Шумков // Технологии бетонов. – 2011. – № 3–4 (56–57). – С. 40–41.

18. *Михеенков, М.А.* Оптимизация и визуализация подбора состава тяжёлых бетонов / М.А. Михеенков, В.А. Хлыбов // Технологии бетонов. – 2011. – № 7–8 (60–61). – С. 55–57.

19. *Дворкин, Л.И.* Развитие теории проектирования составов цементного бетона. Часть 1 / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин // Технологии бетонов. – 2011. – № 11–12 (64–56). – С. 64–67.

20. Дворкин, Л.И. Расчёт состава дорожного цементного бетона с нормированными прочностью и морозостойкостью / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин, Ю.В. Гарницкий // Технологии бетонов. – 2013. – № 1 (78). – С. 26–29.

21. Formulation of Mathematical Problem Describing Physical and Chemical Processes at Concrete Corrosion / S.V. Fedosov, V.E. Roumyantseva, I.V. Krasilnikov, B.E. Narmania // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – Vol. 13. – No. 2. – P. 45–49.

22. Physical and Mathematical Modeling of the Mass Transfer Process in Heterogeneous Systems under Corrosion Destruction of Reinforced Concrete Structures / S.V. Fedosov, V.Eu. Roumyantseva, I.V. Krasilnikov, V.S. Konovalova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 456. – P. 012039.

23. Моделирование тепломассопереноса в системе газ – твёрдое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Часть 1. Общая физико-математическая постановка задачи / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, Р.М, Алоян [и др.] // Строительные материалы. – 2014. – № 7. – С. 86–91.

24. К вопросу описания сушки полимеров уравнением молекулярной диффузии / А.М. Климов, С.П. Рудобашта, В.М. Нечаев, Ю.А. Тепляков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19. – № 2. – С. 334–338.

25. Расчёт процесса сушки гранул поликапроамида / С.П. Рудобашта, М.К. Кошелева, К.Э. Разумеев, А.В. Пичугин // Известия высших учебных заведения. Серия: Химия и химическая технология. – 2013. – Т. 56. – № 12. – С. 118–123.

Literatura

1. Benc D.P., Pel'c M.A., Uinpeler Dzh.Vliyanie vodocementnogo otnosheniya na svojstva cementnyh kompozicij v rannej stadia ih tverdeniya [Early-Age Properties of Cement-Based Materials:

Influence of Water-to-Cement Ratio]. *Cement i ego primenenie* [*Cement and Its Applications*], 2011, no. 3, pp. 47–52.

2. Shatov A.N. Vysokoprochnye betony. Dostupnye sposoby himicheskoj modifikacii [High-Strength Concrete. Available Chemical Modification Methods]. *Tekhnologii betonov* [*Concrete Technologies*], 2012, no. 9–10 (74–75), pp. 9–11.

3. Ivanov I.M., Matveev D.V., Orlov A.A., Kramar L.Ya. Vliyanie vodocementnogo otnosheniya i superplastifikatorov na process teplovydeleniya, gidratacii i tverdeniya cementa [Influence of Water-Cement Ratio and Superplasticizers on the Heat Release, Cement Hydration and Hardening Processes]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [*Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction Engineering and Architecture*], 2017, vol. 17, no. 2, pp. 42–49.

4. Maksimova I.N., Erofeev V.T., Makridin N.I., Polubarova Yu.V. Vliyanie struktury cementnogo kamnya na process deformirovaniya i razrusheniya pri szhatii [Influence of Cement Stone Structure on Deformation and Damage Processes under Compression]. *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo* [*Regional Architecture and Engineering*], 2016, no. 4 (29), pp. 5–10.

5. Ochkina N.A. Vliyanie modificiruyushchih dobavok na poristost' radiacionno-zashchitnogo kompozita [The Influence of Modifying Additives on the Porosity of a Radiation-Protective Composite]. *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo* [*Regional Architecture and Engineering*], 2018, no. 2 (35), pp. 71–75.

6. Razumejchik V.S., Derechennik S.S. Vliyanie mikronapolnitelya na process formirovaniya mikrostruktury cementnogo kamnya [The Influence of Microfiller on the Hydrated Cement Microstructure Forming]. *Vestnik Brestskogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura* [*Bulletin of the Brest National Technical University. Construction and architecture*], 2012, no. 1 (73), pp. 46–51.

7. Kovshar S.N., Babickij V.V. Proektirovanie sostava betona s uchetom ego morozostojkosti [Design of Concrete Composition Taking into Account Its Frost Resistance]. *Vestnik Belorusskogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta* [*Bulletin of the Belarusian National Technical University*], 2010, no. 3, pp. 15–20.

8. Kulikov Yu.N. Uplotnyaemost' betonnojsmesi – kriterij prochnosti i vodonepronicaemosti obdelki podzemnyh sooruzhenij [Compaction of Concrete Mixtures – Strength and Water Resistance Criterion of Underground Construction Lining]. *Gornye nauki i tekhnologii* [*Mining Science and Technology*], 2014, no. 3, pp. 182–189.

9. Mihajlova N.A., Stefanenko I.V. Mnozhestvennye regressionnye modeli prochnosti betona na szhatie [Multiple Regression Models of Concrete Compressive Strength]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [*Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*], 2017, no. 49 (68), pp. 30–42.

10. Dvorkin L.I., Zhytkovskiy V.V., Stepasyuk Yu.A., Kovalchuk T.V. Proektirovanie sostavov fibrobetona s ispol'zovaniem eksperimental'no-statisticheskih modelej [Design of the Fiber Concretes Composition with the Using Experimental-Statistical Models]. *Tekhnologii betonov* [*Concrete Technologies*], 2016, no. 11–12 (124–125), pp. 29–35.

11. Petrova T.M., Serenko A.F. Teoreticheskie osnovy prognozirovaniya vliyaniya vodocementnogo otnosheniya na velichinu rannej prochnosti plastificirovannogo cementnogo kamnya [Theoretical Bases of Forecasting the Water-Cementation Dependence Effect on the Size of Rapid Hardening of Plasticized Cement Stone]. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov* [*Bulletin of Civil Engineers*], 2009, no. 1 (18), pp. 61–64.

12. Belyh A.G., Kukarskih L.A. Vliyanie vodocementnogo otnosheniya na deformativnye harakteristiki cementobetona [Influence Water-Cement Relation to Deformation Performance of Concrete]. *Aktual'nye voprosy problem sushki i termovlazhnostnoj obrabotki materialov v razlichnyh otraslyah promyshlennosti i agropromyshlennom komplekse* [*Actual Problems of Drying and Heat and Moisture Treatment of Materials in Various Industries and Agro-Industrial Complex*] : sbornik nauchnyh statej Pervyh Mezhdunarodnyh Lykovskih nauchnyh chtenij, posvyashchennyh 105-letiyu akademika A.V. Lykova. Kursk, 2015, pp. 277–281.

13. Kudaibergenova N.A., Chumadova L.I., Vatin N.I., Bakirova I.G., Bratashov A.A., Kabanov A.V. Kinetika nabora prochnosti betona pri rannem zamorazhivanii [The Kinetics of Curing of Concrete at an Early Freeze]. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdanij i sooruzhenij* [*Construction of Unique Buildings and Structures*], 2016, no. 2 (41), pp. 7–17.

14. Nikishkin V.A. Mikrostruktura cementnogo kamnya i ee vliyanie na vodonepronicaemost' i prochnost' betona [Microstructure of a Cement Stone and Its Impacton Water Resistance and Durability of Concrete]. *Tekhnologii betonov* [*Concrete Technologies*], 2012, no. 5–6 (70–71), pp. 6–9.

15. Gnyrya A.I., Abzaev Yu.A., Korobkov S.V., Gauss K.S. Modelirovanie gidratacii portlandcementa bez mineral'nyh dobavok [Modeling of the Portlandcement Hydration without Mineral Additives]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo* [*News of Higher Educational Institutions. Construction*], 2018, no. 1 (709), pp. 25–35.

16. Hvastunov V.L., Kalashnikov V.I., Hvastunov A.V., Pausk V.V. Parametry vodopogloshcheniya i poristosti poroshkovo-aktivirovannogo vysokoprochnogo betona s nizkim udel'nym raskhodom cementa na edinicu prochnosti [Parameters of Water Absorption and Porosity of Powder-Activated High Strength Concrete with Low Specific Content of Cement per Unit of Strength]. *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo* [*Regional Architecture and Engineering*], 2014, no. 4, pp. 45–51.

17. Shumkov A.I. Matematicheskaya model' zakona vodocementnogo otnosheniya v proizvodstve tyazhelogo betona [Mathematical Model of the Law of the Water Cement Relation in Manufacture of Heavy Concrete]. *Tekhnologii betonov* [*Concrete Technologies*], 2011, no. 3–4 (56–57), pp. 40–41.

18. Miheenkov M.A., Hlybov V.A. Optimizaciya I vizualizaciya podbora sostava tyazhelyh betonov [Optimization and Visualization Selection of the Heavy Concrete Structure].

Tekhnologi i betonov [*Concrete Technologies*], 2011, no. 7–8 (60–61), pp. 55–57.

19. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. Razvitie teorii proektirovaniya sostavov cementnogo betona. Chast' 1 [Development of the Theory of the Design of Compositions of Cement Concrete. Part 1]. *Tekhnologii betonov* [*Concrete Technologies*], 2011, no. 11–12 (64–56), pp. 64–67.

20. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L., Garnickij Yu.V. Raschet sostava dorozhnogo cementnogo betona s normirovannymi prochnost'yu I morozostojkost'yu [The Calculation of the Road Cement Concrete Composition with Specified Strength and Frost Resistance]. *Tekhnologii betonov* [*Concrete Technologies*], 2013, no. 1 (78), pp. 26–29.

21. Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Narmania B.E. Formulation of Mathematical Problem Describing Physical and Chemical Processes at Concrete Corrosion. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2017, vol. 13, no. 2, pp. 45–49.

22. Fedosov S.V., Roumyantseva V.Eu., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S. Physical and Mathematical Modeling of the Mass Transfer Process in Heterogeneous Systems under Corrosion Destruction of Reinforced Concrete Structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 456, p. 012039.

23. Fedosov S.V., Kotlov V.G., Aloyan R.M., Yasinski F.N., Bochkov M.V. Modelirovanie teplomassoperenosa v sisteme gaz – tverdoe pri nagel'nom soedinenii elementov derevyannyh konstrukcij. Chast' 1. Obshchaya fiziko-matematicheskaya postanovka zadachi [Simulation of Heat-and-Mass Transfer in Gas-Solid System at Nailed Connection of Timber Structures Elements. Part 1. General Physical-Mathematical Statement of Problem]. *Stroitel'nye materialy* [*Construction Materials*], 2014, no. 7, pp. 86–91.

24. Klimov A.M., Rudobashta S.P., Nechaev V.M., Teplyakov Yu.A. K voprosu opisaniya sushki polimerov uravneniem molekulyarnoj diffuzii [Describing the Process of Polymer Drying by Molecular Diffusion Equation]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [*Transactions of the Tambov State Technical University*], 2013, vol. 19, no. 2, pp. 334–338.

25. Rudobashta S.P., Kosheleva M.K., Razumeev K.E., Pichugin A.V. Raschet processa sushki granul polikaproamida [Calculation of Process of Drying of the Granules Polycaproamide]. *Izvestiya Vysshykh Uchebnykh Zavedeniy. Seriya Khimiya I Khimicheskaya Tekhnologiya* [*News of Higher Educational Institutions. Series Chemistry and Chemical Technology*], 2013, vol. 56, no. 12, pp. 118–123.

Федосов Сергей Викторович (Иваново). Доктор технических наук, профессор, академик РААСН. Профессор кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (129337, Москва, Ярославское шоссе, д.26, корпус УЛК, ауд. 522. НИУ МГСУ). Эл. почта: fedosov-academic53@mail.ru.

Румянцева Варвара Евгеньевна (Иваново). Доктор технических наук, профессор, советник РААСН. Директор института информационных технологий, естественных и гуманитарных наук, заведующая кафедрой естественных наук и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (153000, Иваново, Шереметевский пр-т, 21, ГШ-203. ИвГПУ). Эл. почта: varrym@gmail.com.

Коновалова Виктория Сергеевна (Иваново). Кандидат технических наук, доцент кафедры естественных наук и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (153000, Россия, Иваново, Шереметевский пр-т, 21, У-426. ИвГПУ). Эл. почта; e-mail: kotprotiv@yandex.ru.

Гоглев Илья Николаевич (Иваново). Аспирант кафедры естественных наук и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (153000, Иваново, Шереметевский пр-т, 21, У-426. ИвГПУ). Эл. почта: azidplumbum00@mail.ru.

Fedosov Sergey Viktorovich (Ivanovo). Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RAACS. Professor at the Department of Technology of Binders and Concretes of the Moscow State University of Civil Engineering (26 Yaroslavskoye Highway, ULK Building, auditorium 522, Moscow, 129337. MGSU). E-mail fedosov-academic53@mail.ru.

Rumyantseva Varvara Evgenievna (Ivanovo). Doctor of Technical Sciences, Professor, Advisor of RAACS. Director of the Institute of Information Technologies, Natural Sciences and Humanities, Head of the Department of Natural Sciences and Technosphere Security at Ivanovo State Polytechnical University (21 Sheremetevsky pr-t, GSh-203, Ivanovo, 153000. ISPU). E-mail: varrym@gmail.com.

Konovalova Victoria Sergeevna (Ivanovo). Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Natural Sciences and Technosphere Security of Ivanovo State Polytechnical University (21 Sheremetevsky pr-t, U-426, Ivanovo, 153000. ISPU). E-mail: kotprotiv@yandex.ru.

Goglev Ilya Nikolaevich (Ivanovo). Post-graduate student of the Department of Natural Sciences and Technosphere Security at Ivanovo State Polytechnical University (21 Sheremetevsky pr-t, U-426, Ivanovo, 153000. ISPU). E-mail: azidplumbum00@mail.ru.